

Nanoteknologiske Horisonter

Kapitel 2. Nanoteknologi i billeder

Opgaver til afsnit om elektronmikroskop s. 15-22

Af Seniorforsker Jakob B. Wagner, Center for Elektronnanoskopi, e-mail: jakob.wagner@cen.dtu.dk

1. Forholdet mellem accelerationsspændingen V , og elektronernes bølgelængde λ , skrives som:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

hvor m er elektronens masse, e er elektronens ladning og h er Plancks konstant. De typiske værdier for højspændingen ligger mellem 500 V og 1 MV. Prøv selv at regne bølgelængden ud for elektroner der er accelereret ved hjælp af en højspænding på 500 V, 100 kV og 1 MV.

Ligningen er ikke helt korrekt for store accelerationsspændinger, da man skal tage højde for relativistiske effekter, når elektronernes hastighed nærmer sig lysets. Hvis man korrigerer for disse effekter, lyder ligningen:

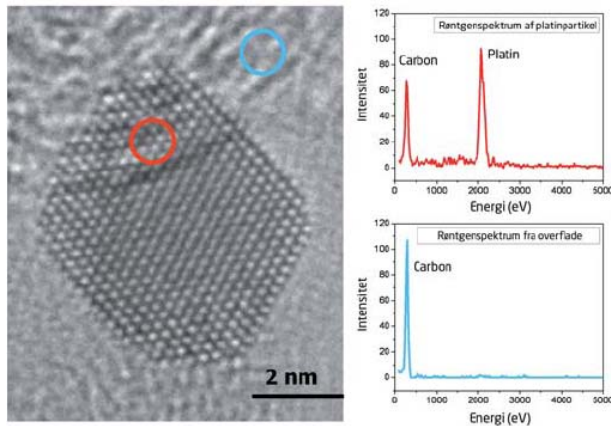
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV(1 + eV / 2mc^2)}}$$

hvor c er lysets hastighed. Hvor stor er forskellen i bølgelængden for de tre værdier, du regnede ud før, hvis den korrigerede ligning bruges?

2. Hastigheden af elektroner med en energi på 300 keV er $2,88 \cdot 10^8$ m/s. Elektronstrålen i et Transmissions Elektronmikroskop (TEM) bærer typisk en strøm på cirka 1 μ A. Hvor langt er der mellem elektronerne i elektronstrålen? Sammenlign med en typisk TEM-prøvetykkelse. Kolonnen er cirka 2 m høj – hvor mange elektroner er der i elektronstrålen i kolonnen på én gang?

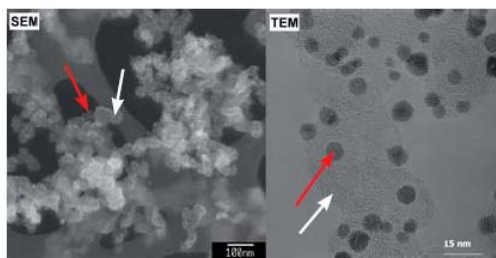
3. Elektronmikroskopibilleder er typisk vist i sort/hvid (gråskala) – hvorfor giver farver ingen mening i elektronmikroskopibilleder?

4. Metallisk platin har en krystalstruktur, hvor et platinatom fylder $15 \cdot 10^{-3}$ nm³. Hvor mange platinatomer er der cirka i platinpartiklen i kapitlets figur 8 (*herunder*)? (antag eventuelt at partiklen er sfærisk).



Figur 8. Elektronmikroskopet fortæller også, hvilke grundstoffer en prøve består af. Venstre: TEM-billede af en prøves form. Højre: Spektrum der viser, at prøven består af platinpartikler på en overflade af carbon.

5. På TEM-billedet i kapitlets figur 6 (*herunder*) ses en katalysator bestående af platinpartikler på et bæremateriale af carbon. Hvis massefylden af katalysatoren er 2700 kg/m^3 , hvor lang tid vil det tage at tage billeder af 1 g katalysator ved samme forstørrelse som i kapitlets figur 6 (se *kapiteltekst*)? Antag at det tager 5 sek. at tage et billede og flytte prøven til en ny position.

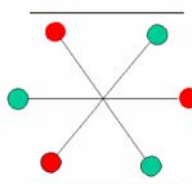


Figur 6. En katalysator bestående af platinnanopartikler (rød pil) på en overflade af carbon (hvid pil) set gennem et SEM (venstre) og et TEM (højre).

Opgaver til afsnit om Skanning Probe Mikroskoper (SPM) s. 23-29

Af Lektor Lektor Jane Hvolbæk Nielsen, Institut for Fysik, e-mail: jane@fysik.dtu.dk, Lektor Sebastian Horch, Institut for Fysik, e-mail: horch@fysik.dtu.dk, og Nanotekar og ph.d.-studerende Robert Jensen, Nanoteket, e-mail: robert.jensen@fysik.dtu.dk

6. For at scanne med et Skanning Tunnel Mikroskop (STM) er det nødvendigt at kunne flytte sin nål i meget små skridt (bedre end 0,05 nm). Dette gøres ved hjælp af en såkaldt piezokrystal, som er vist skematisk i figur 1 (*herunder*). Forklar med dine egne ord, hvorfor krystallen vil ændre bredde, hvis der lægges en spænding mellem elektroderne i toppen og bunden af krystallen. De røde atomer er positive og de grønne er negative.



Figur 1. Piezokrystal

7. En bestemt piezokrystal er i stand til at udvide sig i alt 100 nm, hvis den pålægges en spænding på 20 V. Vi antager, at udvidelsen er linjær. Hvor

nøjagtigt er det nødvendigt at kunne ændre spændingen over krystallen, hvis vi skal flytte vores krystal (og dermed STM-nålen, som er monteret på krystallen) fra afstanden $x = 49,005$ nm til $x = 49,010$ nm?

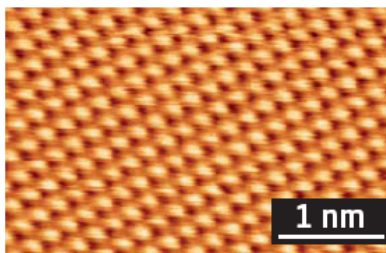
8. Normalt laver man STM-billeder i et kammer, hvor alt luft er pumpet væk (kammeret kaldes derfor et vakuumkammer). Hvis man alligevel fik den idé

at skanne en prøve i atmosfærisk luft, kunne man overveje, om det overhovedet kan lade sig gøre, eller om luftmolekylerne kommer i vejen for tunnelstrømmen. Hvor mange luftmolekyler vil der i gennemsnit omtrent

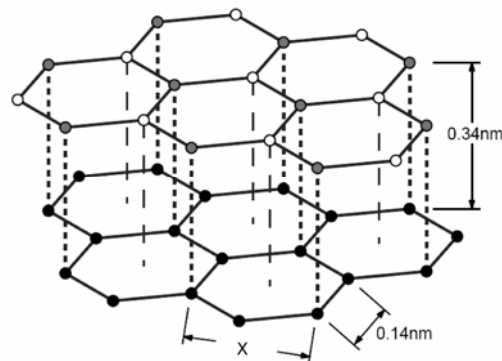
være mellem prøven og nålen, hvis vi antager, at afstanden er 0,1 nm og nålen er så spids, at den slutter i et enkelt atom?

9. Set i lyset af resultatet af opgave 8, hvorfor skanner man så egentlig i vakuum?

10. Prøv at sammenligne det atomart opløste billede af grafit (*herunder øverst*) med figur 2 (*herunder nederst*), som viser en skematisk tegning af grafit.



Figur 10. STM-billede af en grafitoverflade, hvor de enkelte carbonatomer kan ses. Billedet er taget i atmosfærisk luft.



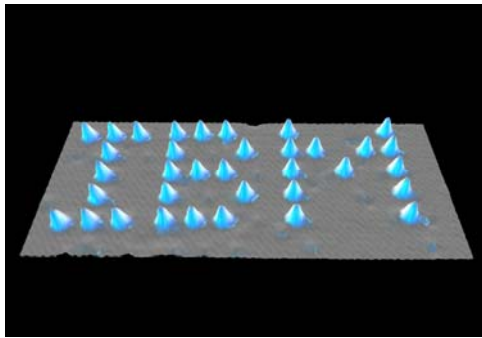
Figur 2. Skematisk tegning af grafit

Grunden til, at de to billeder ligner hinanden relativt dårligt, er, at ikke alle atomer i overfladen af grafit er ens. Som du kan se på figuren, har hvert andet atom et naboatom i laget lige under det. Dette betyder, at disse atomer har en tendens til at trække sin sky af elektroner tættere til sig, og disse atomer er derfor næsten usynlige på STM-billedet. Man kan derfor let blive forvirret, når man skal tolke et STM-billede og tro, at man har målt forkert. Vi forestiller os nu, at vi i forvejen kender afstanden mellem naboatomer i grafit (for eksempel fra en diffraktionsmåling), som er 0,14 nm. Prøv at regne ud, hvilken afstand du skal forvente at se på STM-billedet, som kun viser afstanden mellem de næstnærmeste naboer (afstanden x på figuren). Forsøg nu, om du kan genkende denne afstand på det rigtige STM-billede i kapitelteksten.

11. Et STM-billede består ligesom alle andre digitale billeder af en række enkelte punkter (pixels), som til sammen danner billedet. I STM skal hver pixel måles en ad gangen, i modsætning til et digitalkamera, som måler alle på en gang. Hvis vi gerne vil have et billede på 256 x 256 pixels, hvor lang tid ville det så tage at tage et billede, hvis vi kan måle ét punkt i sekundet?

I virkeligheden kan man måle langt hurtigere end dette. Hvis vi siger, at vi bruger 10 sek. på at tage billedet, hvor mange målinger må vi så foretage i sekundet?

12. Et STM-mikroskop kan ikke kun bruges til at tage billeder af overflader, men også til at lave ændringer på overflader. Det er derfor i princippet muligt at skrive bogstaver med enkelte atomer. Eksempelvis er bogstaverne IBM skrevet med 35 atomer i figur 3 (*herunder*). Prøv at lave et overslag over, hvor mange bogstaver man på den måde kan skrive i prikken over et enkelt 'i' i 'Nanoteknologiske Horisonter'? Gør rede for hvor nøjagtigt du tror, dit gæt er. Hvor mange bogstaver kunne stå i hele bogen?



Figur 3. IBM-logo skrevet med 35 Xenon-atomer¹.

¹ Læs mere om eksperimentet på side 107 i kapitel 7 i 'Nanoteknologiske Horisonter'.